

# 舶用機関の状態監視及び故障診断

## - ディーゼル機関について -

技術研究所 佐々木 千一

### 1 はじめに

鋼船規則に定める機関予防保全設備規則では、機関集中監視装置から得られる情報及び機器(またはその構成部品)の状態を監視するセンサから直接得られる情報に基づき、機器の劣化等の診断を行う「状態監視・診断システム」を規定している。主機関の予防保全のうち、タービン機関については、ISO 等に関連の基準(振動による状態監視・診断の方法)があるので、これを参考に状態監視の方法を定め、診断における判定基準を設定することが可能である<sup>1)</sup>。しかし、ディーゼル機関については、機関を構成する要素の数が極めて多く、損傷形態も多種類であるため、状態監視の方法自体が未だに研究レベルの段階であり、従って、一般的な基準も存在しない。

ディーゼル主機関の予防保全に関して、予防保全設備規則では、船級という立場で監視・診断すべき対象を具体的に示している。現在は、時間基準保全(Time based maintenance)に該当する機関継続検査により、5年毎に機器の検査を実施しているが、本規則は、時間基準保全に代えて、状態基準保全(Condition based maintenance)を実現するための、船級としての最低要件を示したものである。本報では、規則に沿った形で、ディーゼル機関の状態監視・診断技術の現状について述べ、現時点において、実機または実船でその有効性が確認されている要素技術を紹介することにする。

### 2 状態監視・診断システムの分類

状態監視の方法としては、一般に、運転状態に関連する機関諸元を監視する方法と、個別の損傷を対象として専用の状態監視センサを設置し監視する方法の2通りの方法があり、本会の規則では両者を要求している。

前者は、温度・圧力等の計測値に基づいて機器に発生した劣化の兆候を検出するものであり、概念的には性能監視に近い。監視対象の項目は、自動化設備規則の警報項目に近い内容となっているが、以下の点で基本的に異なる。すなわち、自動化設備規則では、警報を発生させる項目を定めているだけなのに対して、予防保全設備規則では、トレンド解析を実施し、データの変化傾向に基づいて診断を行い、さらに保守のための情報を出力することを要求している。劣化の種類としては、主に機器の摩耗や汚損が対象である。従って、例えば回転部品に発生する搔き傷や亀裂を検出するという目的では、この種の監視方法は一般に不向きと考えられる。

後者の場合は、損傷の被害度・頻度の観点から対象とする機器を限定しており、専用の状態監視センサから得られる情報によって、その機器に発生した劣化(損傷)の形態・程度が推定される。劣化の検出感度や診断システムの信頼性は前者よりも高い。監視すべき機器は、本会における過去の重大損傷データを検討し、規則作成時における状態監視技術を考慮して決定されたが、現在も同様と考えてよい。診断に関しては、前者と同様、基本的にはトレンド解析の結果に基づいて実施されるが、より精密な診断が要求される場合には、専用の診断システムが必要となることもある。

以降の説明では、便宜的に前者を「運転状態の監視・診断」、後者を「劣化センサによる監視・診断」として示す。

### 3 運転状態の監視・診断

予防保全設備規則に定める監視項目を表 3.1 に示す。監視項目について、規則集では温度、圧力、その他として分類しているが、ここでは後述する劣化センサによる監視項目と対比できるように、機関上部(燃焼に関連する項目)、機関下部(回転運動部分に関連する項目)、その他(過給機)として分類を行った。

状態監視項目は、自動化設備規則の警報項目に準じた形で選択されているが、実際にはこれだけの項目で機関の運転状態(機関性能)を全て把握できるわけではない。従って、規則では、これに4で述べるセンサからの情報を追加して、総合的に状態監視・診断を行うよう規定している。

表 3.1 ディーゼル主機関の監視項目 (規則 3.2.3(1)関連)

位置	項目	備考
機関上部	シリンダ冷却水各シリンダ 出口温度	
	シリンダ冷却水シリンダ 入口圧力	
	ピストン冷却水(油)各シリンダ 出口温度	
	ピストン冷却水入口圧力	流量でも可
	ピストン冷却油入口圧力	流量でも可。主機の潤滑油を利用する場合は省略可
	燃料弁冷却水(油)出口温度	
	燃料弁冷却水(油)入口圧力	
	排ガス各シリンダ 出口温度又は温度偏差	
	シリンダ 給油器出口流量	
	燃料噴射ポンプ 入口温度又は同粘度	燃料の粘度制御を行う場合に適用
	燃料噴射ポンプ 入口圧力	
	掃除空気室内温度	2 サイクルに適用
	空気冷却器の空気出口温度	
	冷却海水圧力または流量	
始動空気主機入口圧力	中間弁或いは自動始動弁の開閉表示があれば省略可	
機関下部	潤滑油入口温度	
	潤滑油入口圧力	
	潤滑油こし器の出入口間の差圧	
	主推力軸受温度又は同軸受潤滑油温度	
	歯車装置潤滑油入口温度	主機と一体の潤滑油方式の場合は主機と兼用可
	歯車装置潤滑油入口圧力	主機と一体の潤滑油方式の場合は主機と兼用可
	クランクケース内オイルミスト濃度	軸受温度でも可
その他	外部注油方式過給機潤滑油入口圧力	

各監視項目は、トレンド解析によって状態が診断される。但し、項目によっては、そのときの大気圧、周囲温度、海水温度等の環境や負荷の影響を大きく受ける場合もあるので、必要に応じて標準状態に換算しておく必要がある。状態監視の初期値(Base line)としては、海上運転時の計測値が採用される。また、判定基準(上限値)に関しては、監視項目や機関の型式で異なると考えられるので、規則では特に定めておらず、通常は機関メーカーの推奨する値に設定される。

標準状態に換算された計測値(または指標値)は、一般に、図 3.1, 図 3.2 のような形でディスプレイ上に表示される。運転状態の表示において、計測値は機関の負荷状態(機関回転数、機関出力等)に依存するため、初期値や上限値も負荷状態に応じて変化する。トレンド解析では、記録された過去のデータから、計測値が上限値に達するまでの運転時間が予測され、その予測運転時間に基づいて、劣化の兆候が検出された機器に対して修復作業が立案される<sup>2)</sup>。

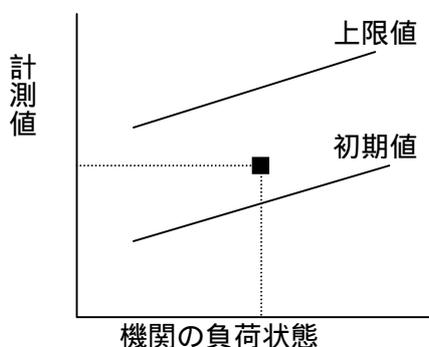


図 3.1 運転状態の表示

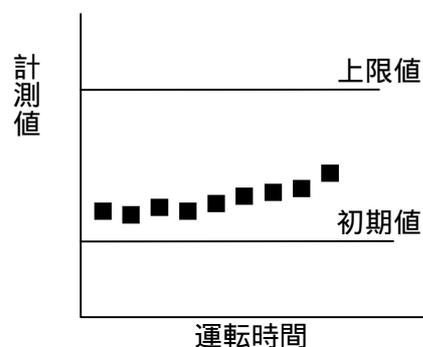


図 3.2 トレンド表示

劣化が検出された監視項目から劣化発生機器(または構成部品)を推定する作業はソフトウェアによって行われるが、これは主に機関メーカーに蓄積されたデータや解析技術に大きく依存する。例えば、排気温度が上昇した場合には、その原因として

負荷の増大(船体の汚損、プロペラ曲損等)

燃料弁:噴孔の拡大

過給機:空気側の汚損、バルブ・タービンプレートへの燃焼生成物の付着

掃気室:火災発生、空気漏れ

燃料油:清浄不足

排気弁:吹き抜け、動弁装置の不良

等があり、劣化発生箇所の候補が複数考えられ、従って、発生箇所をさらに絞り込むためには、排気温度以外の情報も考慮しながら総合的に判断する必要がある。また、劣化発生箇所は必ずしも1箇所とは限らない。(2次損傷を含め)複数存在する場合には、さらに高度な診断機能が必要となる。

関連する研究として、シミュレーション計算と実機試験により機関の経年劣化を詳細に調査した SR235 の研究がある。この報告書<sup>3)</sup>によれば、例えば過給機単体が劣化した時の機関性能の変化は図 3.3 のように表される。また、燃料系 2 要素、掃排気系 2 要素、燃焼系 2 要素の合計 6 要素を用いて行った複合要素の組み合わせ試験(6 要素全てが整備限度まで劣化した状態を想定)の結果は、図 3.4 のように表され、排気温度に対しては掃排気系の劣化が大きく影響を及ぼすことがわかる。

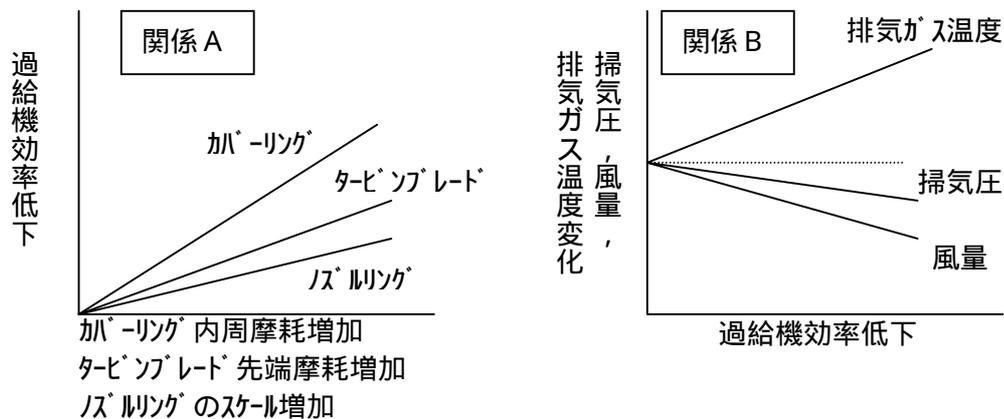


図 3.3 単体要素試験(過給機)

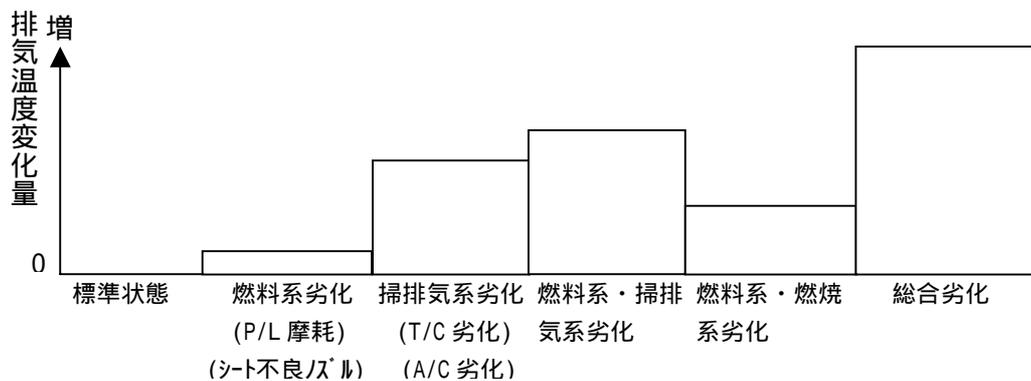


図 3.4 劣化要素組合わせ試験(排気温度変化量)

故障診断技術を向上させるには、はじめに、対象とする実機関の性能データ(状態データ)と、それに対応する劣化情報を収集する作業が必要となる。次に、機関部品の劣化と機関性能との関係を数式化し、劣化要因を組み合わせた場合の機関性能への各々の影響度を数値化することによって診断システムを構築でき、部品交換時期の予測も可能となる<sup>3)</sup>。本会の規則では、診断システムの詳細にまでは踏み込んでいないが、何らかの形で保守すべき劣化部品を示すことは要求している。性能データに基づく故障診断に関しては、未だに発展途上の段階と考えられるが、機関の適正な保守管理の面から技術の向上が望まれる分野である。

#### 4 劣化センサによる監視・診断

機関予防保全設備規則では、前3の監視項目で用いられる温度・圧力センサの他に、表 4.1 に示す専用センサの設置を要求しており、全てのセンサ情報を基に、表 4.1 左の項目を監視・診断するよう規定している。

監視・診断の対象は、燃料・燃焼に関連する項目が中心である。表 3.1 と対比してわか

るように、従来用いられてきたセンサからの情報では、燃焼状態を正確に把握することができないため、筒内圧力センサ、掃除空気圧力センサ等を追加している。燃焼室まわりの構成部品に関しては、重要部品であるシリンダライナ及びピストンリングに着目し、これらの状態を監視・診断できるセンサを要求している。燃料油こし器の状態監視は、こし器自体の監視を目的とするものではなく、燃料油の性質を監視し、燃料油良否判定の1つのパラメータとするために設けられた項目である。

回転運動部分に関連する項目としては、主軸受があり、その状態監視のため温度センサ等の設置を要求している。後述するように、温度センサは軸受の溶融を検出するという点では確実性の高いものであるが、潤滑状態の監視には向かない。本来は潤滑状態を監視できるセンサを要求するべきであるが、現在でもその方法は確定していないので、少なくとも溶融状態を確実に検出できる温度センサを選択している。

過給機性能の監視は、過給機の状態が機関性能に及ぼす影響が最も大きい<sup>3)</sup>ことから、重要な監視項目の1つである。排気ガス側及び給気側の入出力箇所での圧力及び温度を計測することにより、過給機効率の計算が可能となる。また、これらの情報は、過給機自体の診断のみならず、機関の他の部位における診断にも役立つものである。

以下、表4.1との関連で、燃焼室まわりと主軸受の監視・診断の例を紹介する。

表 4.1 追加要求されるセンサ (規則 3.2.3(2) ~ (6)関連)

(監視・診断の対象)	(追加要求されるセンサ)
燃焼状態 高圧燃料系統の状態	筒内圧力センサ, 掃除空気圧力センサ, 燃料噴射圧力センサ, クランク角度センサ
燃焼室まわりの構成部品の 状態	シリンダライナ温度センサ, シリンダ注油流量センサ, ピストンリングの状態を監視するセンサ
燃料入口こし器の状態	こし器の入口・出口の差圧を計測するセンサ
主軸受の状態	主軸受の温度センサを標準とする
過給機の性能低下	排気ガス側, 給気側の入口・出口の 圧力センサ及び温度センサ

#### 4.1 燃焼室まわり

予防保全設備規則では、ピストンリングの摩耗量を推定でき、折損等の異常状態を判別できるような専用のセンサの設置を要求しているが、ライナ温度等の情報からリングの状態を検知できることが検証された場合はその方式も認めることにしている。

近年、ライナ/リングにおける潤滑状態の監視に関する研究が盛んに行われているが、これは開放検査のコストを抑えるためと言うよりも、むしろスカフィングの早期発見が目的である。軽度のスカフィングは、ライナ冷却水温度の上昇のような機関諸元の変化で検知することは困難なので、一般には専用のセンサが使用されている。

実機または実船で、有効性がある程度確認されている方法と、参考として、それらの検出感度及び信頼性を評価した結果を表 4.2 に示す。

表 4.2 ライナ/リングの潤滑状態・摩耗状態の検出方法

状態量	検出方法	検出感度	信頼性
油膜厚さ	ライナ壁に孔を設け、ギャップセンサを設置		
シリンダドレン油中の摩耗粒子	各シリンダのドレン管から油を採取 (フェログラフ分析等)		
ライナ温度	温度センサ (ライナ壁に埋め込み)		
機関振動 (高周波)	加速度センサ		(診断システムによる)

● 油膜厚さの計測

最小油膜厚さ、リングのプロフィールが計測可能であり、直接的な方法であるため最も信頼性があると考えられるが、初期コストが高いことや就航船で採用しにくいことが欠点である。最近、実船の大型2ストローク機関を用いて油膜厚さを計測し、リングの回転も解析した例が示された(図 4.1 参照)が、油膜厚さと船舶・機関の諸条件との関連性等、未だに解明されていない点も多く残っている<sup>4)</sup>。

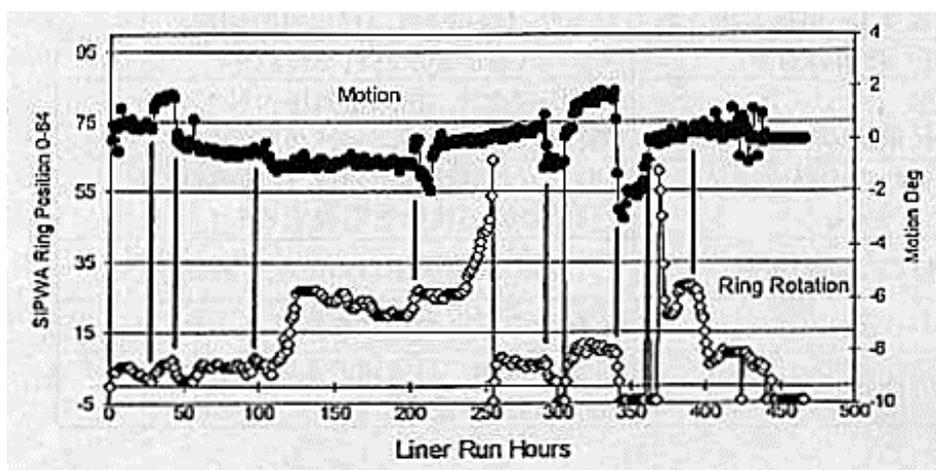


図 4.1 トップリングの回転に及ぼす船の運動の影響

● シリンダドレン油の分析

実船モニタリングの結果によれば、ライナ/リング摩耗の検出には、鉄摩耗粉の分析が有効であることが検証されている。本会の研究によれば、フェログラム顕微鏡観察から得た鉄シビア摩耗(約 30 μm 以上)及び鉄カッティング摩耗(約 4 μm 以上)の両粒子数が、ライナ/リングの摩耗率と相関があることが確認されている<sup>5)</sup>。鉄濃度が 0~100ppm の範囲で推移する場合は適正な摩耗状況であり、200ppm 以上に増加した場合には何らかの異常があると考えられている。また、機関運転中に本船の手によってドレン分析ができるような、油中の摩耗鉄粉の簡易測定器も既に開発されている<sup>6)</sup>。

ドレン分析の問題は、測定の間隔にある。常時監視方式の分析器の設置はコスト的に困難であるため、現状では、サンプル油を分析機関に送付するか、あるいは、簡易測定器を用いることになる。この場合、1航海1回程度の分析が限度であろう。

● ライナ温度の計測

ライナ/リングの異常磨耗発生時には、ライナ温度が通常レベルより約 20 上昇し、図 4.2 のように 10~20 分の時間周期で温度のふらつきが発生することが知られている<sup>7)</sup>。ライナ壁に温度センサを埋め込む方法は、比較的信頼性が高い。規則ではリングの状態を監視できるセンサの設置が規定されており、ライナ温度及び筒内圧力の組合せ等で検出できればその方式に替えられると記述しているが、温度監視のみでリング異常の有無を判定できると考えられる。

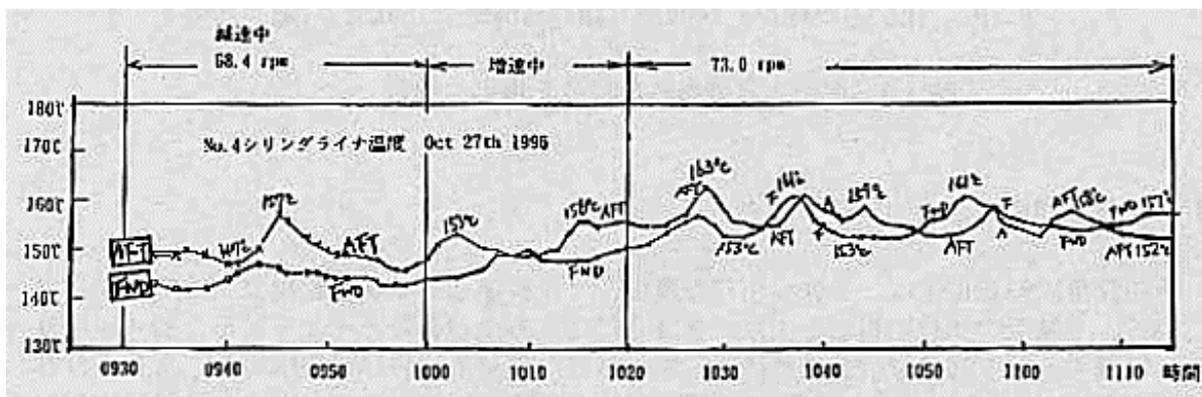


図 4.2 主機シリンダライナ温度変動波形図

この方式でシステムの信頼性を低下させる可能性があるのは、リング合い口の位置である。すなわち、センサ位置に合い口がきた場合には、合い口からの燃焼ガスの吹き抜けによりライナ温度が上昇するので、この点を考慮した診断システムを構築する必要があるが、リングの回転速度は極低速であり、スカフィング発生時の温度変化とは時間周期で区別することが可能と考えられる。

● 機関振動(高周波振動)の計測

比較的低コストで、かつ就航船でも用意に採用できるという利点があるものの、振動で軽度なスカフィングを検出できるかどうか自体が問題である。極端なスカフィングならば検出可能と考えられる<sup>8)</sup>が、軽度の状態で早期に発見するためには、さらなる検証が必要である。最近、シリンダライナとピストンリングの摺動で発生する振動を実船で計測し、正常振動信号の経年変化を詳細に解析した例が報告された<sup>9)</sup>が、実用化の観点から、今後は、実際の損傷との対応を明らかにすることを期待したい。

一般に機関振動と言えば、H形(0節),X形(1節),x形(2節)等の10Hz程度の振動を想起するが、これら比較的低周波の振動はスカフィングではほとんど変化しないと考えられる。振動・音響の周波数帯域と損傷の種類との関係を図 4.3 に示す。これによれば、軸受、歯車等の機械要素に発生する異常は、数 kHz から数 10kHz の周波数帯域の振動・音響監視により検出することができ<sup>10)</sup>、スカフィング発生時も同様と考えられる。

振動計測で問題となるのは、摩擦振動よりも、燃焼・爆発、燃料ニードル弁の着座、排気弁の着座、リングと油溝(または掃気ポート)との接触、排気の流動等による振動の方が大きな振幅として計測されることである<sup>11)</sup>。従って、一般回転機械のように、単純に振動平均値の変化を監視しても有益な情報は得られないことは明らかである。振動加速度は、ピストン速度が最大となるクランク角において顕著に現れるので、このクランク角で高周波振動の変化を監視すればリング異常の判定が可能と考えられるが、実船での検証が必要と考えられる。

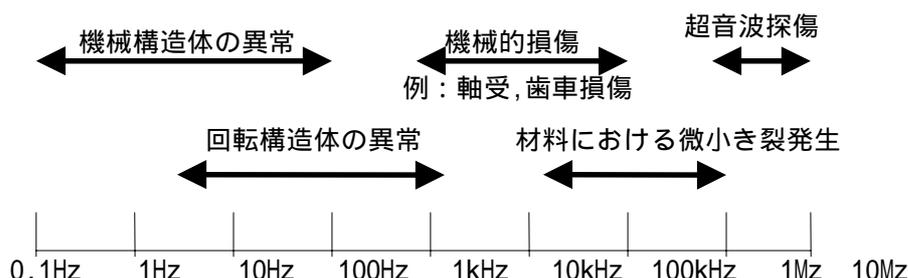


図 4.3 振動・音響周波数帯域と損傷の種類

#### 4.2 軸受監視の方法

予防保全設備規則では、主軸受用に温度センサを標準とする状態監視センサが要求されている。主軸受の状態監視としては、表 4.3 に示す方法が有効と考えられる。表 4.3 以外に、軸受キャップに変位計を埋め込み、軸の軌跡から最小油膜厚さを求める方法も十分有効と考えられるが、これは主に軸受の潤滑特性を求めるため、設計段階における研究レベルの方法として採用されており、今のところ実船のモニタリングに採用されそうな様子はないのでここでは省略する。

表 4.3 軸受監視の方法

状態量	検出方法	検出感度	信頼性
システム油中の摩耗粒子	戻り管から油採取 (フェログラフィ等)	( )	( )
システム油の劣化	戻り管から油採取 (FT-IR 等)		
軸受温度	温度センサ (軸受に埋め込み)		
軸受振動(高周波)	加速度センサ		(診断システムによる)

- システム油のフェログラフィ分析

フェログラフィ法には、顕微鏡で摩耗粒子の形態を観察し粒子数をカウントする分析フェログラフィ法と、大径摩耗粒子と小径摩耗粒子を自動的に分別する装置を用いる定量フェログラフィ法がある。後者はDR (Direct Reading)法とも呼ばれる。DR フェログラフィ分析装置の概略を図 4.4 に示す。サンプル油は、粘度に応じた所定の希釈倍率で希釈され、油送チューブを通して摩耗粉ごと沈着管の中に運ばれる。沈着管の上下には、流れ方向に磁力分布のある磁場が与えられており、摩耗粉は、沈着管の入口側に大径の摩耗粒子が、出口側には小径の摩耗粒子がトラップされる。大径摩耗粒子(粒径約 5 $\mu$ 以上)と小径摩耗粒子(粒径 2~3 $\mu$ 以上)の量は、沈着管の上下に設置された発光・受光フォトセンサーによって計測され、それぞれ DL, DS として表される。総摩耗粒子量 WPC (Wear Particle Concentration)は、それらの合計値 DL + DS として表される<sup>12)</sup>。

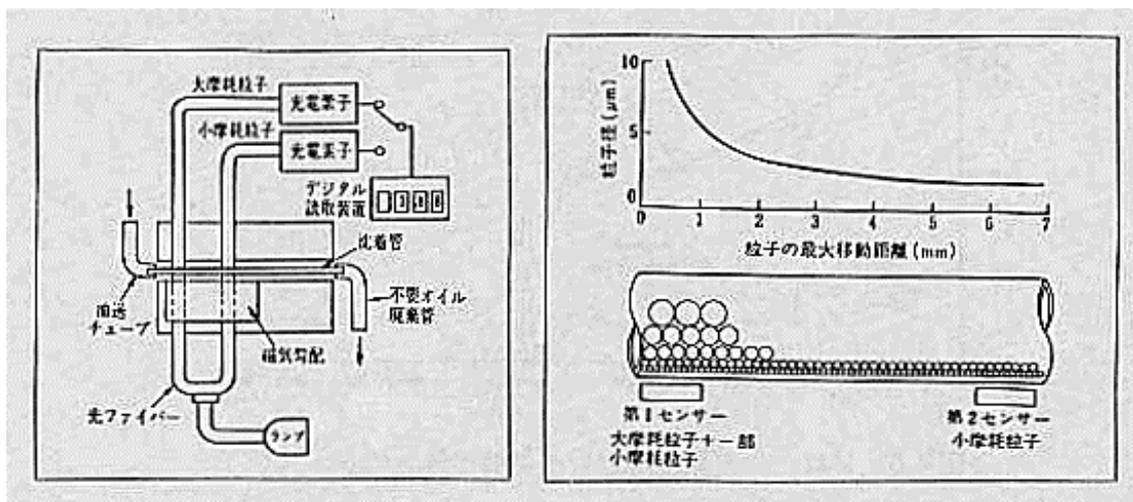


図 4.4 DR フェログラフィ分析装置の概略

2 ストロークディーゼル機関について本会が行った調査によれば、DR 値が 10 WPC/ml 以下の場合、その系の軸受メタルの潤滑状態は極めて良好であり、また、60 WPC/ml 以上の場合は、何らかの損傷が発生している可能性が高い<sup>13)</sup>。また、自動車用エンジンの摺り合わせ運転に、機関の戻り管から潤滑油を採取して DR 法で分析した例では、時間の経過と共に DL 値が大きく減少することが確認されている<sup>14)</sup>。これまでの経験によれば、通常摩耗は DS 値、異常摩耗は DL 値の変化として現れると考えられる。

フェログラフィ分析を主軸受の監視・診断に適用する上で問題となるのは、劣化(損傷)が発生した軸受の特定である。すなわち、機関の構造上、各軸受単独にサンプル油を採取することが不可能であるため、摩耗粉を検出しても、それがどの軸受のものであるかを見出すことができない。従って、摩耗軸受を特定し、さらにその点検時期を指示するような診断システムを構築しようとするならば、他の方法と併用することになるであろう。その意味で表 4.3 の感度・信頼性の項目にはカッコ付きで評価結果を示した。

● システム油の劣化

システム油の劣化を調査する方法の 1 つとして、ここでは赤外分光法(以下 IR 法と呼ぶ)を取り上げる。前述のフェログラフィ法が、軸受の摩耗状態を検出するのに対して、この方法は、むしろ軸受の異常摩耗・溶融を引き起こすシステム油の劣化状態を検出する方法であると見なすことができる。一般の故障診断が、損傷を軽度な段階で見出すものであるのに対して、システム油の劣化状態の監視は、軸受損傷を未然に防止するという意味合いがあり、特に船用中速機関の場合には大きな効果を期待できる<sup>15)</sup>。

図 4.5 は、ブローバイが発生している船用中速機関の新油補償赤外吸収スペクトル図である。ブローバイ発生時の赤外吸収スペクトルは、正常な運転状態と比較して右下がりの傾向を示し、高波数域での吸収が大きく出ていることがわかる。また、硫酸カルシウムの生成を示す 1160[1/cm](8600[nm])の吸光度が高いことも特徴の 1 つである<sup>16)</sup>。

2 ストローク主機関において、使用済みのシリンダ油が、シリンダライナ、掃気室、スタフィンボックスを経てドリップ油としてクランクケースに流入することが問題となっているが、IR 法はこの場合にも適用可能である。図 4.6 は、ドリップ油の混入がある 2 ストローク主機関におけるシステム油の新油補償赤外スペクトル図の例である。ドリップ油の混入は、波数 865[1/cm](11500[nm])におけるピークの存在によって確認できると考えられている<sup>16)</sup>。

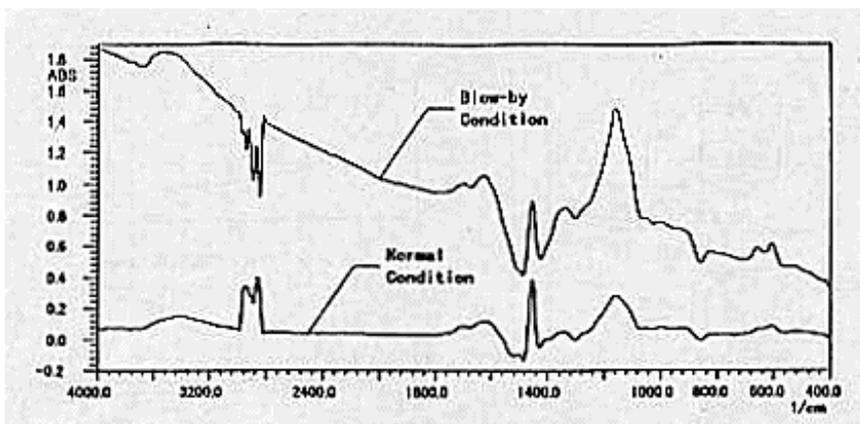


図 4.5 ブローバイ発生時の新油補償赤外スペクトル図

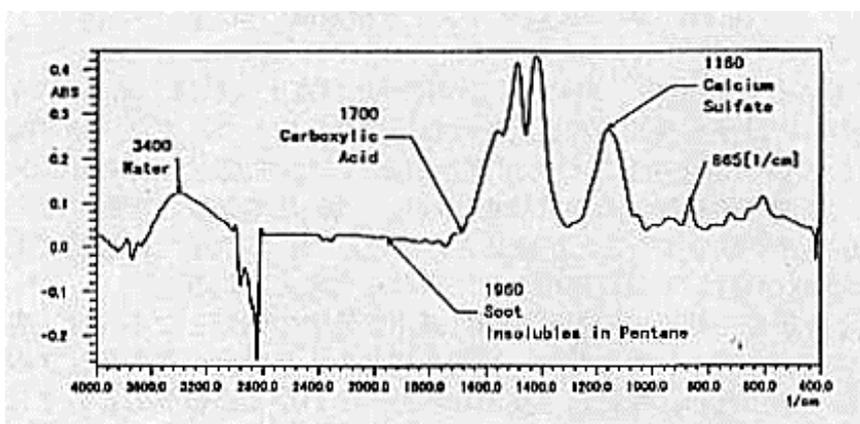


図 4.6 ドリップ油の混入があるシステム油の新油補償赤外スペクトル図

● 軸受温度

主軸受の温度計測は、本会が標準と考えている方法である。温度上昇が確認された時には、温度計が故障している場合を除き、軸受メタルが溶融していると考えてよく、溶融の検出に対する信頼性はかなり高い。但し、予報保全はトレンド解析を基本としているので、その点で意味のある信号が得られるかどうかは疑問である。すなわち、軸受メタルの溶融が発生した場合、温度は急上昇すると考えられるが、劣化の進行に伴い温度が徐々に上昇してゆくと考えにくく、トレンド解析が意味を持たない可能性がある。損傷の最終確認としては十分意味があるが、軸受メタルのき裂発生、剥離等を初期の段階で検出しようとする場合は、劣化の検出感度が高い他の方法と併用する必要があると考えられる。それ故、表 4.3 には検出感度を として示した。

● 軸受振動

各軸受位置に加速度センサーを設置し、振動信号に基づいて軸受の状態を診断する方法である。診断目的の振動計測であるため、図 4.3 で示したように、高周波の振動加速度が計測の対象となる。センサーの設置箇所としては、軸受部またはその近傍が望ましいが、クランクケースの内部に設置して長期モニタリングを実施する場合は、防爆構造とする必要がある。初期コストが高くなるためか、採用された例がほとんどなく、研究自体も少ない。クランクケースの外部にセンサを設置して診断を行った例が幾つかある程度である。

図 4.7 は、発電機両端のジャーナル軸受で計測した加速度信号の例である。a), b)はそれぞれ 2.0MW の全負荷における軸受異常時の信号と軸受修理後の信号、c)は無負荷時の信号である。軸受異常時の図 a)を見ると、2箇所スパイク波形が顕著となっていることがわかる<sup>17)</sup>。

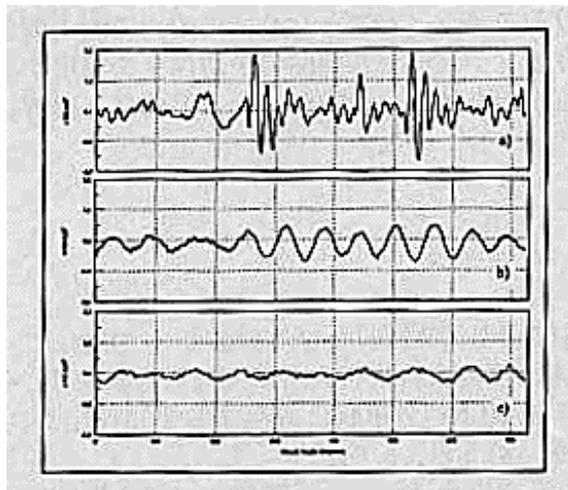


図 4.7

発電機用軸受における  
加速度信号の記録  
(回転数：1000rpm)

図 4.8 は、発電機用エンジンのエンジンブロックに 9 個の加速度センサー (V1, V2, ..., V9) を取り付け、クランクジャーナル軸受を診断した例である。専用の診断システムを用い、損傷があった 3 台の軸受 (No.2, 3, 4) の判別を行っている<sup>17)</sup>。主機関の各主軸受において診断した例はほとんどないので、ここでは発電機用の例を示したが、原理的には主機関においても可能であり、今後期待される分野の研究である。

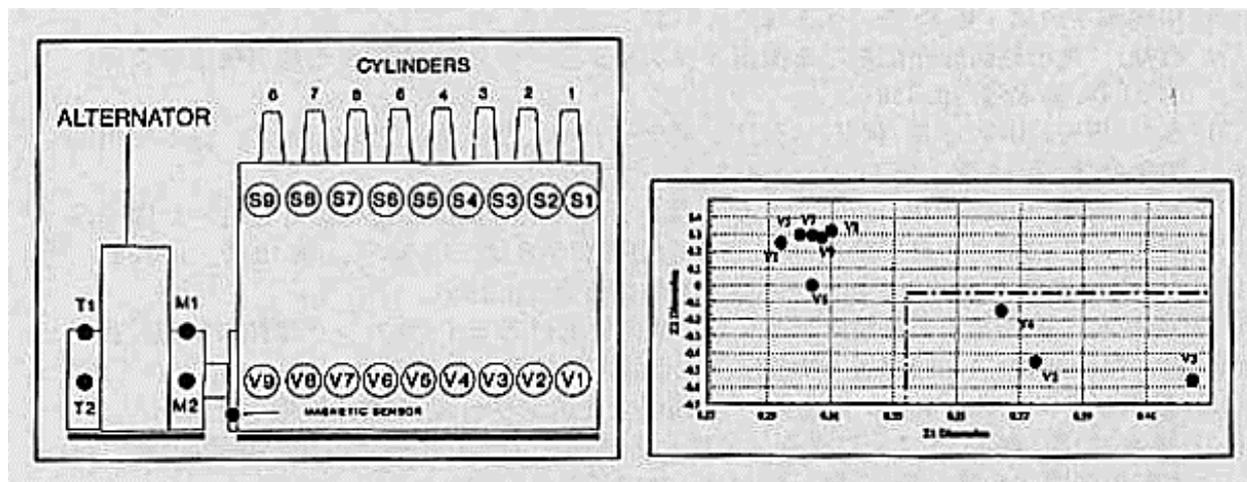


図 4.8 振動計測ポイント及び軸受の診断

## 5 あとがき

機関予防保全設備規則に沿って、ディーゼル主機関における状態監視・故障診断の現状を説明した。同規則がNKで成立してから約5年が経過したが、その間、ディーゼル機関部品の一部に関しては、状態監視技術の進展が見られ、実船での検証結果等が報告された。しかし、トータル的な予防保全は、未だに研究レベルの段階であり、実現できていないのが現状である。

技術の進歩を阻害している要因の1つに初期コストがある。予防保全は、機関の劣化(損傷)を軽度の段階で早期に発見し、劣化部品に関する情報を乗組員(または管理者)に通知することを目的とするので、基本的に機関損傷が減るわけではない。従って、開放検査に要する費用との比較で予防保全の導入を検討することになるが、現状では、トータル的な予防保全はかなりのコストアップとなり、その点で船主側も導入をためらわざるを得ないと推測される。今後、ディーゼル機関の予防保全を実現するに向けて、より低コストで信頼性のある状態監視の方法及び診断システムの開発を期待したい。

## 参考文献

- (1) 佐々木, "船用機関の状態監視及び故障診断 - 主としてタービン機関について -", 平成10年度日本海事協会技術研究所研究発表会講演集, p.57
- (2) 稗田, 国枝, 志村, 鈴木, "全運航に寄与する予知保全システムの開発", 日本船用機関学会誌, 第29巻, 第9号, p.649
- (3) (社)日本造船研究協会 SR235 "経年劣化に伴う機関性能劣化ライフサイクルの研究" 成果報告書
- (4) Dr. Stewart Moore, "The Complexities of Piston Ring Lubrication in a Large Two-Stroke Marine Diesel Engine," Proceedings of the 22<sup>nd</sup> CIMAC (1998), p.575
- (5) 橋本, 馬場, 青木, "低速ディーゼルシリンダドレン油分析によるシリンダ潤滑状態の診断", 日本船用機関学会誌, 第34巻, 第10号, p.689
- (6) 山田, 菅原, 羽根田, 永井, "シリンダ油ドレンによる機関摺動部の状態監視", 日本船用機関学会誌, 第35巻, 第7号, p.472
- (7) 石井, "大形外航船舶における機器トラブルシューティング", 日本船用機関学会誌, 第34巻, 第5号, p.328
- (8) 永井, 平野, 川崎, 赤根, 荻野, "シリンダライナ・スカフティングの診断", 日本船用機関学会誌, 第14巻, 第11号, p.916
- (9) 木村, 寺嶋, 中井, 山田, 武田, "2サイクルディーゼル機関の振動信号を用いた機関診断法 - 正常信号の経年変化 -", 日本船用機関学会誌, 第33巻, 第10号, p.738
- (10) 山崎, "異常の検出と予知" (1988), 工業調査会, p.183
- (11) 佐々木, "振動を用いた船用ディーゼル機関におけるライナ・リング摩耗の状態監視", 日本機械学会 第8回交通・物流部門大会講演論文集, p.317
- (12) 日本プラントメンテナンス協会, "実践保全技術シリーズ3 潤滑技術", 1991
- (13) 橋本, 馬場, 青木, "フェログラフィによる低速ディーゼル軸受の潤滑状態観察", 日本船用機関学会誌, 第33巻, 第11号, p.799
- (14) Qi Kaisheng et al, "Wear Study of Diesel Engine in Break-In," Proceedings of the 22<sup>nd</sup> CIMAC (1998), p.587
- (15) T.Takaishi et al, "Diagnosis System on Medium Speed Diesel Engine," Proceeding of the I.S.M.E. Yokohama (1995)
- (16) 平田, 渡沼, 嶋, 宮野, "赤外分光法による船用ディーゼル機関システム油の評価", 日本船用機関学会誌, 第33巻, 第6号, p.448
- (17) F. Jimenez Espadafor et al, "A Vibroacoustical Method for the Daignosis of Diesel Plant Engine Failures," Proceedings of the 22<sup>nd</sup> CIMAC (1998), p.619